

Beton- und Stahlbetonbau



- Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauweise
- Adaptive Tube-in-Tube Brücken
- Gütebewertung von ZfPBau-Verfahren
- Nichtlineare Berechnungen im Tunnelbau
- Schadensmindernde Wirkung von Wasserdampf-Brandbekämpfungsanlagen
- Bohrpfehlwände an der Schleuse Dörverden
- Innovationen im Brückenbau

Ergebnisse von Brandversuchen zur Beurteilung der schadensmindernden Wirkung von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen

Im Rahmen des Projektes SOLIT2 wurde anhand von über 30 Großbrandversuchen im Mai/Juni 2011 die Wirksamkeit von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen in Verbindung mit der Brandlüftung in Straßentunneln erprobt. Im Maßstab 1:1 wurden dabei je zur Hälfte Flüssigkeitsbrände („Poolfires“) mit Brandlasten zwischen 30 MW und 100 MW sowie Feststoffbrände mit kompletten LKW-Ladungen (Brandlast 100 MW, bestehend aus Holzpaletten) ausgeführt. Neben der Überprüfung der Wirksamkeit waren die Wechselwirkungen zwischen Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen und anderen Sicherheitseinrichtungen in Tunneln von besonderem Interesse, um mithilfe eines ganzheitlichen Sicherheitskonzeptes mögliche Einsparpotenziale identifizieren und praxismgerechte Lösungen entwickeln zu können. Vor dem Hintergrund der steigenden Relevanz des vorbeugenden Brandschutzes in Tunneln erfolgt in der vorliegenden Veröffentlichung eine Auswertung ausgewählter Versuchsdaten hinsichtlich der Wirkung von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen auf eine Verminderung von Bauwerksschäden.

1 Einleitung

1.1 Sicherheit im Tunnel

Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass sich der in den vergangenen Jahren verzeichnete Anstieg des Verkehrs auf Straße und Schiene auch zukünftig fortsetzen wird. Insbesondere in Straßentunneln steigen mit einer höheren Verkehrsbelastung auch die Unfallrisiken an. Da Tunnel als hochrangige Verkehrsknotenpunkte besonders zur Aufrechterhaltung der gesamten Infrastruktur beitragen, müssen sie eine möglichst hohe Verfügbarkeit aufweisen. Folglich nimmt auch die Bedeutung des vorbeugenden Brandschutzes für Tunnelbauwerke weiter zu.

Auch wenn in den letzten Jahren keine schweren Brandunfälle aufgetreten sind, darf sich die Gesellschaft durch diesen glücklichen Umstand nicht in trügerischer Sicherheit wagen. Die Tunnelbrände der vergangenen Dekade, beispielsweise im Euro-, Montblanc- und Tauern-Tunnel, belegen, dass Unfälle unvermittelt auftreten und unter Umständen schnell eskalieren können. In den vorgenannten Fällen waren aufgrund der schnellen Brandentwicklung ein Vordringen der Einsatzkräfte bis zum Brandherd und das Bekämpfen des Brandes aufgrund der vorherrschenden Temperaturen, der entstehenden Brandgase und deren Rauchdichte nicht möglich.

Große Brände in Tunneln können neben Personenschäden auch hohe Sachschäden und lange Ausfallzeiten we-

Results of Fire Tests to assess the mitigating effect of Water Mist Fire Fighting Systems

Within the scope of the SOLIT2 project, the efficiency of water mist fire fighting systems in conjunction with fire ventilation in road tunnels was determined based on more than 30 major fire tests in May/June 2011. On a 1:1 scale, half of these tests were executed as pool fires with fire loads ranging from 30 to 100 MW and the other half as solid matter fires with complete lorry loads (fire load 100 MW – consisting of wooden pallets). Apart from checking the efficiency, the interaction between water mist fire fighting systems and other safety facilities in tunnels was of particular interest, with the aim of identifying possible savings potentials and developing practice-oriented solutions based on a holistic safety concept. Against the background of increasing relevance for preventive fire protection in tunnels in the present article an evaluation of selected experimental data on the effect of water mist fire fighting systems to reduce concrete damage is shown.

gen der notwendigen Reparaturen verursachen. Bei der Planung von Verkehrstunneln müssen daher verkehrstechnische, bauliche, anlagentechnische und organisatorische Brandschutzmaßnahmen getroffen werden, um das Risiko eines Brandes und die möglichen Folgen für Mensch und Sachgüter auf ein Minimum zu reduzieren.

Das Gesamtsicherheitskonzept einer Tunnelanlage umfasst die verschiedenen zuvor genannten Einzelmaßnahmen. Ziel ist es, ein gesellschaftlich akzeptiertes Restrisiko zu erreichen und rechnerisch nachzuweisen. Das Gesamtsicherheitskonzept wird dabei auch durch wirtschaftliche Gesichtspunkte beeinflusst, da es i. d. R. nicht möglich ist, alle theoretisch machbaren technischen Sicherheitsmaßnahmen umzusetzen. Hier setzt das Forschungsprojekt SOLIT2 an, in dem mögliche Kompensationen einzelner Sicherheitsmaßnahmen untersucht wurden. Durch geeignete Integration von Brandbekämpfungsanlagen in das Gesamtsicherheitskonzept sollen Einsparungen bei anderen Sicherheitsmaßnahmen ermöglicht werden und so die Gesamtkosten nicht steigen.

In Tunneln installierte Brandbekämpfungsanlagen können das Erreichen der im Gesamtschutzkonzept definierten Schutzziele unterstützen. Dazu gehören neben dem Personenschutz, der Ermöglichung und Unterstützung der Fremdrettung sowie der Brandbekämpfung auch der Bauwerksschutz. Die den Bauwerksschutz betreffenden Komponenten umfassen dabei im Wesentlichen die

Sicherstellung der Tragfähigkeit und die Erhaltung der Gebrauchstauglichkeit (z. B. Wasserdichtigkeit) sowie die Reparierbarkeit von möglichen Schäden. Weiterhin gehören dazu die Ausbildung von Flucht- und Rettungswegen, Aufstellplätzen, Angriffswegen der Feuerwehr sowie schließlich auch die Anordnung von Einrichtungen zur Rauch- und Wärmeabfuhr.

Die folgenden Ausführungen und insbesondere die Besprechung ausgewählter Versuchsergebnisse beschränken sich hauptsächlich auf die Wirkung von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen hinsichtlich des baulichen Brandschutzes.

1.2 Aktuelle Entwicklungen beim baulichen Brandschutz

Ausgangsbasis der brandschutztechnischen Bemessung von Straßentunneln sind in der Regel zeitabhängige Temperaturverläufe der Brandbeanspruchung, die vereinfachend „Brandkurven“ genannt werden. Mit Brandkurven soll der sich nach dem Durchzünden („flashover“) einsetzende, voll entwickelte Brand abgebildet werden [5].

In Tunnelstrukturen werden primär Ort-, Fertigteil- und Spritzbeton ohne oder mit Stahlbewehrung in Form von Stäben, Matten oder Fasern verwendet. Insbesondere durch den schnellen Temperaturanstieg bei Bränden und die daraus resultierende nahezu schockartige Temperaturbelastung kommt es zu verschiedenen Versagensmechanismen. Zu nennen sind dabei das Lösen des Verbundes, das Versagen der Zug- oder Druckzone und ein Versagen durch Betonabplatzungen [2].

Durch mehrere interagierende Bruchmechanismen kann es zu einem prozessartigen Versagen kommen. Bei Normalbeton bleiben lokale Abplatzungen von Zuschlagskörnern im ersten Schritt auf die Oberfläche (ca. Durchmesser der Zuschläge) begrenzt [2]. Dabei können zunächst kleine kraterförmige, etwa korngroße Abplatzungen bis zu einer Tiefe von max. 20 mm auftreten. Bei fortwährender Brandbeanspruchung wiederholt sich dieser Prozess, sodass dezimetertiefe Schäden entstehen. Dagegen reichen explosionsartige Abplatzungen sofort bis in größere Tiefen und hier oftmals bis in den Verbundbereich der Bewehrungslage. Sie können damit auch zu einer unmittelbaren Beeinträchtigung des Tragverhaltens führen. Die wichtigste Ursache für explosionsartige Abplatzungen sind Zugspannungen, welche im temperaturbeanspruchten Beton beim Ausströmen von Wasserdampf durch Reibung an den Porenwandungen infolge hydrostatischer Wasserdampfdrücke entstehen [2].

Für deutsche Straßentunnel im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) ist die anzuwendende Brandkurve in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) Teil 5 „Tunnelbau“ festgelegt [4]. Für den baulichen Brandschutz von

Tunnelinnenschalen wird hier für Tunnel in offener und geschlossener Bauweise (Spritzbetonbauweise) eine Betondeckung von mindestens 60 mm (Nennmaß) als ausreichend angesehen. Damit soll eine zu starke Erwärmung der tragenden Bewehrung über die kritische Temperatur von 300 °C hinaus verhindert werden.

Am 21.09.2012 wurden mit dem Allgemeinen Rundschreiben zum Straßenbau 13/2012 die ZTV-ING in einer aktualisierten Fassung (Ausgabe März 2012) eingeführt [1]¹. Die zuvor aufgeführte Betondeckung von 60 mm wird in dieser Fassung unverändert genannt. Jedoch wurde hinsichtlich der zuvor geforderten zusätzlichen Brandschutzbewehrung in Form einer verzinkten Matte (N94, Deckenbereich offene Bauweise, Zwischendecken) eine Änderung bekannt gemacht. Auf diese, innerhalb der Regelbetondeckung liegende und an der tragenden innen liegenden Bewehrung befestigte zusätzliche Brandschutzbewehrung darf verzichtet werden, wenn dem Beton Polypropylenfasern (PP-Fasern) zugegeben werden. Diesbezüglich werden sowohl Mengen als auch Abmessungen der Fasern empfohlen (2 kg PP-Fasern je m³ Beton, Fasergeometrie: Länge 6 mm, Durchmesser 0,016 bis 0,020 mm [1]). Abweichungen von der Menge und Geometrie der Fasern sind zugelassen; die jeweilige Eignung ist dann jedoch – ggf. auch durch Brandversuche – nachzuweisen. In der Literatur werden auch geringere Fasermengen (1 bis 2 kg PP-Fasern je m³ Beton) genannt. Darüber hinaus wurden die ZTV-ING in der aktuellen Fassung in Teil 5 Abschnitte 1, 2 und 3 um folgende Passage zu thermischen Einwirkungen ergänzt (Abschnitt 10.2 (2)):

„Für Straßentunnel, bei denen ein lokales Versagen infolge Brand mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einem Verlust des Bauwerks bzw. zum Verlust der Tragfähigkeit eines angrenzenden Bauwerkes führen kann, sind die Anforderungen an den baulichen Brandschutz gesondert festzulegen. Hierzu gehören z.B. Tunnel mit geringer Überdeckung unter Gewässern. In der Regel ist hierbei die Vollbrandphase von 25 auf 55 Min. zu verlängern.“

Bei einer auf 55 Minuten verlängerten Vollbrandphase ist die den ZTV-ING zugrunde liegende Forderung, dass die Temperatur an der Bewehrung 300 °C nicht übersteigt, allein durch eine 6 cm dicke Betonüberdeckung nicht mehr einzuhalten [6]. Indirekt leitet sich daraus die Forderung nach gesonderten passiven (z. B. Brandschutzplatten, -putz) oder aktiven Brandschutzmaßnahmen ab. Bei aktiven Brandschutzmaßnahmen gewinnen Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen insbesondere im Ausland zunehmend an Akzeptanz. Dabei steht oftmals ein Gewinn

¹ Nach Fertigstellung dieses Beitrags wurde die ZTV-ING mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS) 03/2013 vom 24.01.2013 nochmals aktualisiert. Gegenüber der hier referenzierten Version sind im Wesentlichen die Verweise auf nationale Normen durch Verweise auf europäische Normen ersetzt worden. Die „Hinweise zu Planung, Entwurf und Ausführung“, die mit dem ARS 13/2012 veröffentlicht wurden und auf die im Folgenden Bezug genommen wird, gelten unverändert weiter.

an Sicherheit im Vordergrund, der aber zusätzliche Kosten nach sich zieht, wenn eine Brandbekämpfungsanlage als additive Komponente vorgesehen wird.

Im Gegensatz dazu wurde das deutsche Projekt „Safety of Life in Tunnels 2“ (SOLIT2) im Jahr 2009 mit der Zielsetzung gestartet, die Kosten für die gesamte Sicherheitsinstallation in einem Tunnel nicht zu erhöhen. Vielmehr sollten die Wechselwirkungen zwischen Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen (WN-BBA) und anderen Sicherheitseinrichtungen in Straßentunneln, wie z. B. der Brandlüftung, untersucht werden, um so mit einem ganzheitlichen Ansatz ein Kompensationspotenzial zu ermitteln. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages finanziell geförderte Projekt wurde im März 2012 beendet. Neben der Weiterentwicklung und Verbesserung der Anlagentechnik umfasst das Forschungsprojekt auch die Entwicklung und Validierung von Simulationswerkzeugen zur mathematisch-numerischen Erfassung der Interaktion zwischen Wassernebel, Brand und Lüftung. Darüber hinaus rundet eine ganzheitliche Betrachtung der Nutzungszykluskosten sowie die Erstellung eines Planungsleitfadens das Programm ab. Dieser Planungsleitfaden ist mit weiterführenden Anhängen unter www.solit.info veröffentlicht.

Von zentraler Bedeutung für SOLIT2 sind die Erkenntnisse, welche im Rahmen von über 30 Großbrandversuchen im Mai und Juni 2011 in einem Versuchstunnel in Spanien gewonnen wurden (Bild 1). Dabei kamen je zur Hälfte Flüssigkeitsbrände („Poolfires“) mit Brandlasten zwischen 30 MW und 100 MW sowie Feststoffbrände mit kompletten LKW-Ladungen (bestehend aus einer 100 MW-„Ersatzbrandlast“ aus Holzpaletten) zum Einsatz. Neben einer anfänglichen Optimierung der Brandbekämpfungsanlage sollte mit den Großversuchen einerseits deren Wirksamkeit unter realen Bedingungen nachgewiesen werden. Andererseits waren die Versuche notwendig, um Daten für die Entwicklung bzw. Kalibrierung numerischer Modelle für die komplexen Vorgänge beim Einsatz von Wassernebel zu gewinnen. Darüber hinaus konnten aus den Großversuchen Erkenntnisse für die Kompensationsmöglichkeiten beim Einsatz von Wassernebelanlagen gewonnen werden. Im Folgenden werden die Durchführung der Großversuche kurz erläutert sowie ausgewählte Ergebnisse vorgestellt [9].

2 Durchführung der Brandversuche

2.1 Versuchstunnelgeometrie

Die Brandversuche wurden in der spanischen Versuchseinrichtung „Tunnel Safety Testing“ (TST) in San Pedro de Anes durchgeführt. Der dort verfügbare Versuchstunnel besitzt eine Länge von insgesamt 600 m und ist im Grundriss leicht S-förmig angelegt. Er besitzt eine Längsneigung von 2 ‰ und weist im Rohbau einen für Straßentunnel charakteristischen Hufeisenquerschnitt auf (Breite: 9,55 m, Höhe: 8,10 m, Bild 2). Um im Brandbe-



Bild 1 Versuchstunnel San Pedro de Anes
San Pedro de Anes test tunnel

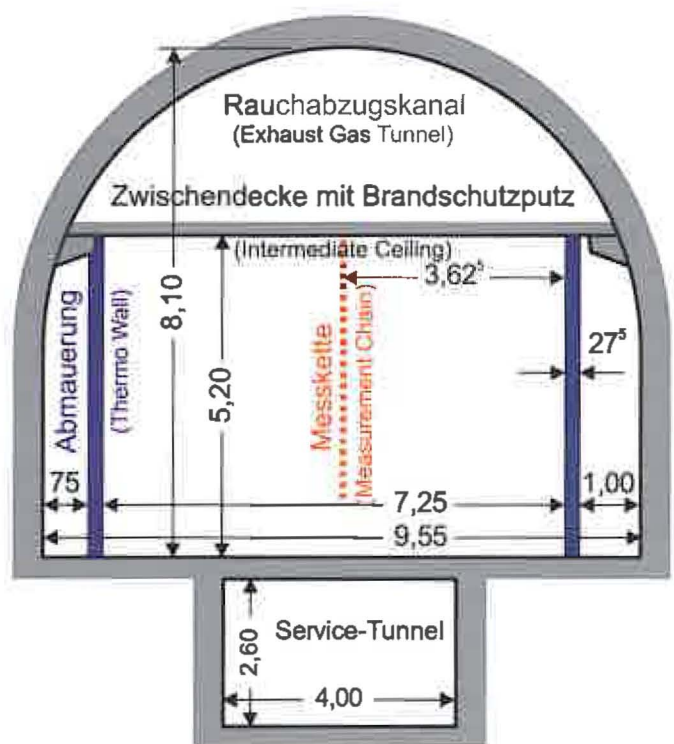


Bild 2 Querschnitt Versuchstunnel
Cross-section of test tunnel

reich die Betonkonstruktion des Tunnels vor zu hohen Temperaturen zu schützen, musste dort durch den Einbau von seitlichen Abmauerungen der Versuchsquerschnitt auf 7,25 m Breite eingeschränkt werden (Bild 2). Die Höhe des Versuchsbereichs war durch die mit einem Brandschutzputz geschützte Zwischendecke auf 5,20 m festgelegt. Der Raum über der Zwischendecke wurde als Abzugskanal für die Halbquerlüftung genutzt. Hinter den seitlichen Abmauerungen wurden die umfangreichen Mess- und Aufzeichnungsgeräte installiert.

Für alle Entfernungsbezeichnungen wurde die Mitte der Brandlast in Tunnellängsrichtung zu 0,00 festgelegt. In Strömungsrichtung erfolgt die Bezeichnung von Messquerschnitten u.ä. mit „D“ (für „downstream“) und der entsprechenden Meterzahl. Gegen die Strömungsrich-

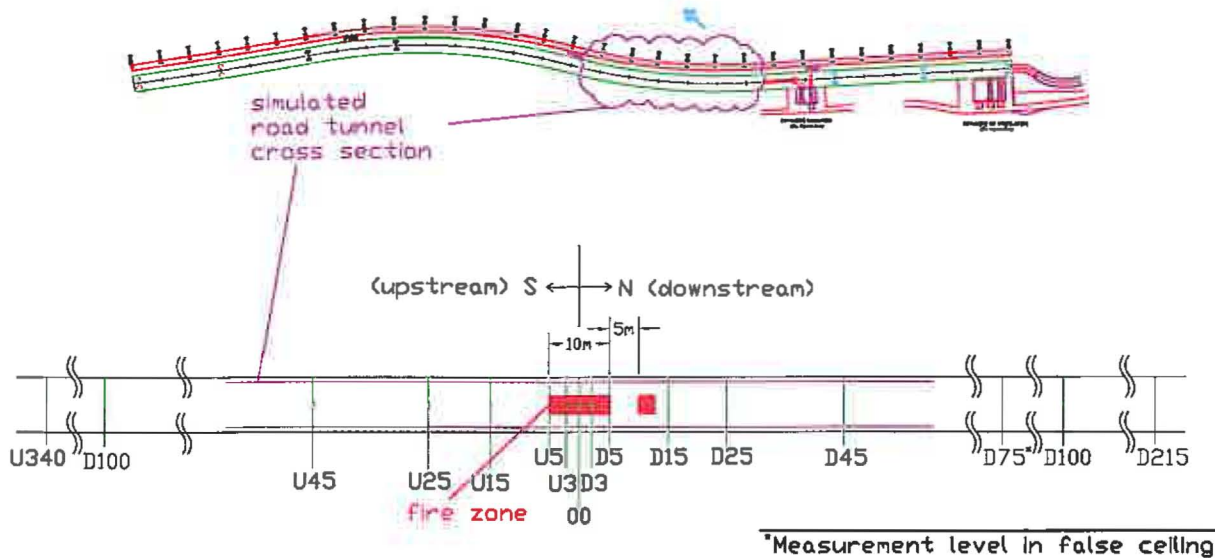


Bild 3 Grundriss Versuchstunnel mit Messquerschnitten
Layout of test tunnel with measurement cross-sections

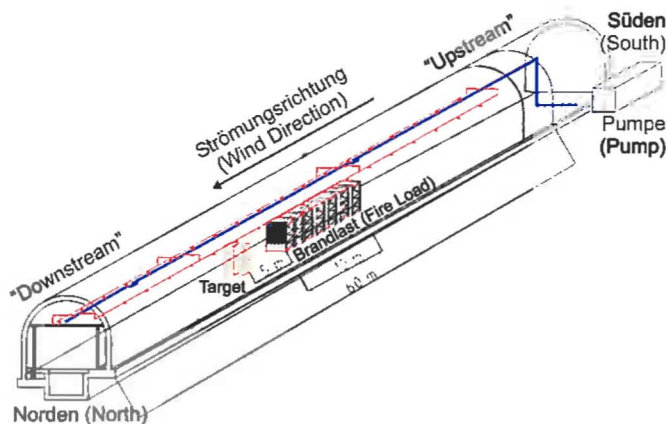


Bild 4 Wassernebel-Brandbekämpfungsanlage und Brandlastanordnung
Water mist fire suppression system and fire load set-up

tung erfolgt die Zählung dementsprechend mit „U“ (für „upstream“). Ein Messquerschnitt, der beispielsweise 45 m hinter der Mitte der Brandlast angeordnet ist, wird also mit „D045“ bezeichnet (Bild 3).

2.2 Wassernebel-Brandbekämpfungsanlage

Zur Durchführung der Versuche wurde im Versuchsbereich des Tunnels über 60 m Länge temporär eine Hochdruckwassernebel-Brandbekämpfungsanlage installiert (Wasserdruck >35 bar, maximale Pumpenleistung ca. 2000 l/min). In Längsrichtung waren zwei Reihen mit Düsen unterhalb der Zwischendecke befestigt. Die Hauptversorgungsleitung war auf der Zwischendecke verlegt (Bild 4).

2.3 Lüftung

Der Tunnel ist mit einer Ventilationsanlage für Längs- und Halbquerlüftung ausgestattet. Mit sechs an der

Decke befestigten Strahlventilatoren können Längsströmungen von 1 bis 6 m/s realisiert werden. Die optional zuschaltbare Halbquerlüftung saugt über eine Lüftungsstation am nördlichen Ende des Tunnels oberhalb der Zwischendecke bis zu 120 m³/s Abluft ab (Luftgeschwindigkeiten im Lüftungskanal bis zu 30 m/s). In der Decke zwischen Tunnel und Abluftkanal sind 14 Lüftungsklapfen mit je 1,5 m² Bruttoquerschnittsfläche installiert. Die Halbquerlüftung ist für Brände bis rund 30 MW Wärme-freisetzung dimensioniert.

2.4 Feststoffbrände (LKW-Brand)

Der Versuchsaufbau für einen Feststoffbrand (100 MW) bestand jeweils aus 408 Standard-Euro-Holzpaletten. Dies entspricht einem Gewicht von rund 9 t und einem Gesamtenergiegehalt von 110 bis 140 GJ. Die Brandlast hatte eine Länge von 10 m, eine Breite von 2,40 m sowie eine Höhe von 2,50 m und war damit in der äußeren Kubatur einem LKW nachempfunden. In Tunnellängsrichtung war sie symmetrisch zum Nullpunkt platziert (Station U005 bis D005). Bei der Mehrzahl der Feststoffbrandversuche (11 von 15) wurden die Paletten mit einer PVC-Plane abgedeckt. Dies spiegelt einerseits eine realistische Situation im Straßenverkehr wider, bei der ein Brand auf der Ladefläche unter der Plane entsteht. Andererseits stellt dies ungünstige Randbedingungen für die Wassernebel-Brandbekämpfungsanlage dar, weil der Brand relativ lange vor dem von oben versprühten Wassernebel geschützt wird.

Zur Überprüfung, ob bei einem Brand ein Brandübersprung zwischen zwei Fahrzeugen stattfindet, wurde auf der Abstromseite, also in Strömungsrichtung hinter der Brandlast („downstream“), in 5 Metern Entfernung (bei Station D010) ein Palettenstapel als Zielbrandlast aufgebaut (sog. „Target“). Dieser Palettenstapel hatte dieselbe Höhe und dieselbe Breite wie die Brandlast (Bild 4).

2.5 Flüssigkeitsbrände

Für die Flüssigkeitsbrände wurden Stahlwannen verwendet, die mit Diesel gefüllt waren. Je nach gewünschter Wärmefreisetzungsrate (z. B. 30, 60 oder 100 MW) wurde eine unterschiedliche Anzahl von 2,5 m breiten und 40 cm hohen Wannen verwendet (je ca. 2 bis 4 m², in Summe z. B. 16, 28 oder 51 m² Oberfläche), die mit 330 l, 630 l bzw. 1 140 l Diesel befüllt waren. Zur Zündung wurde zusätzlich je Wanne 1 Liter Benzin verwendet.

2.6 Messsystem

Während eines Brandversuchs wurden die relevanten Messgrößen mit insgesamt 152 Sensoren im Tunnel alle 2 Sekunden aufgezeichnet. Zu den je nach Versuchsdauer bis ca. 350 000 pro Versuch aufgezeichneten Messwerten gehören:

- Temperatur
- Wärmestrahlung
- Luftgeschwindigkeit
- Gaskonzentration (O₂, CO₂, CO)
- Druck und Durchflussrate der Brandbekämpfungsanlage
- Luftfeuchtigkeit

Bei jedem Versuch wurden die Wetterdaten außerhalb des Tunnels gemessen. Bei den Feststoffbränden wurde vor den Versuchen die Feuchtigkeit der Brandlast (Holz) ermittelt. Darüber hinaus wurden kontinuierlich mit Normal- und Infrarotvideoaufzeichnung das Temperaturfeld und die Sichtbedingungen festgehalten. Die Versuche wurden mit Fotos dokumentiert. Mit den Temperaturmessungen wurde im Wesentlichen die Temperatur der Luft gemessen. Einige Messstellen waren so nah an einer Oberfläche angeordnet (Wand oder Zwischendecke), dass die dort erfassten Werte (auf der sicheren Seite liegend) auch als Oberflächentemperatur interpretiert werden können. Die reale Temperatur der Oberfläche lag jedoch unterhalb der so gemessenen Werte.

Um Vergleichswerte für die Temperaturentwicklung innerhalb eines Bauteils zu erhalten, wurde ca. 7,5 m hinter der Nullposition (bei Feststoffbränden also ca. 2,5 m hin-

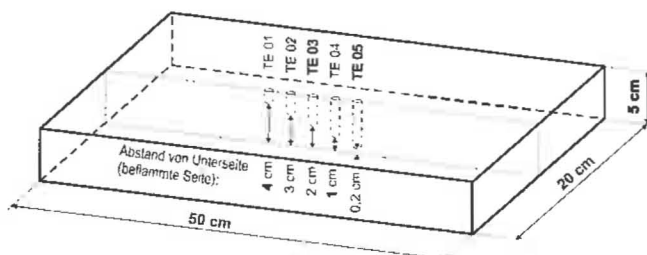


Bild 5 Betonplatte mit rückseitig eingebrachten Thermoelementen zur Messung der Temperaturverteilung über die Tiefe
Concrete slab with rear introduced thermocouples for measuring the temperature distribution over the depth

ter dem Ende der Brandlast) eine handelsübliche Fertigbetonplatte unter der Tunneldecke befestigt, in der über rückseitige Bohrungen fünf Temperatursensoren installiert waren (Bild 5). Die Sensoren hatten einen Abstand von ca. 0,2, 1, 2, 3 und 4 cm von der dem Brand zugewandten Unterseite. Die Montage der Betonplatte erfolgte ohne Zwischenraum unmittelbar unterhalb der Zwischendecke, sodass die Temperatureinwirkung nahezu vollständig nur von der dem Tunnel zugewandten Seite erfolgte.

2.7 Versuchsablauf

Bei Feststoffbränden wurde die Wassernebelanlage in der Regel 4 Minuten nach der Zündung aktiviert. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass von der Entstehung bis zur Detektion eines Brandes 2 Minuten vergehen und nach weiteren 2 Minuten die vollständige Aktivierung der Wassernebelanlage erfolgt ist. Bei Flüssigkeitsbränden erfolgte die Aktivierung der Anlage aus versuchstechnischen Gründen bereits 30 Sekunden, nachdem die letzte Brandwanne entzündet wurde, um eine Beschädigung des Versuchstunnels auszuschließen. Aufgrund der nahezu sofortigen Brandentwicklung ist bereits wenige Sekunden nach der Entzündung aller Wannen der Brand voll entwickelt. Eine längere Freibrandphase würde die Wärmefreisetzungsrate nicht weiter erhöhen, sondern nur zu einer möglichen Schädigung der Versuchsanlage führen.

3 Auswertung der Brandversuche

3.1 Flüssigkeitsbrand 30 MW

Als Beispiele für die Flüssigkeitsbrände (Bild 6) werden zunächst exemplarisch zwei „kleine“ Brände mit einer rechnerischen Wärmefreisetzungsrate von 30 MW gegenübergestellt: einmal mit und einmal ohne Aktivierung der Wassernebelanlage. Bei den Versuchen war die Längslüftung jeweils auf rund 2,5 m/s Strömungsgeschwindigkeit eingestellt. Die Halbquerlüftung wurde in beiden Fällen nicht aktiviert. Beim Einsatz der Wassernebelanlage wa-



Bild 6 Flüssigkeitsbrand ca. 20 Sekunden nach Entzündung
Pool fire approx. 20 seconds after ignition

Tab. 1 Randbedingungen Flüssigkeitsbrände
Marginal Conditions for Pool Fires

	Freibrand 30 MW (Nr. 11052601, ohne Wassernebel)	Brandlast 30 MW (Nr. 11052602, mit Wassernebel)	Brandlast 100 MW (Nr. 11060802, mit Wassernebel)
Längslüftung, Strömungsgeschwindigkeit	2,5 m/s	2,5 m/s	3,0 m/s
Halbquerlüftung, Absaugvolumen	–	–	120 m ³ /s
Höhe UK Sprühkopf über Fahrbahn	–	5,00 m	5,00 m

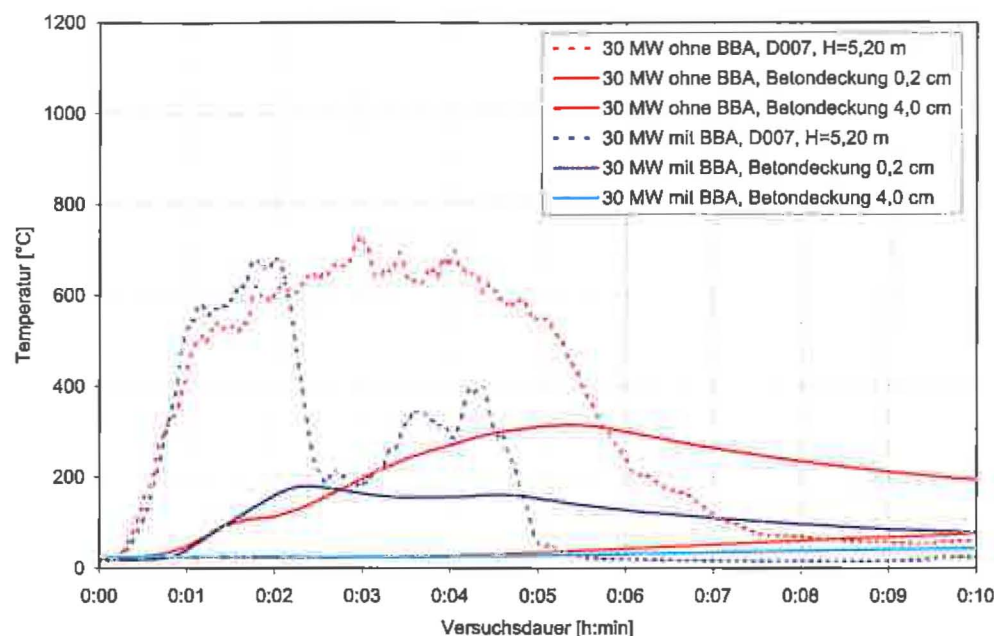


Bild 7 Temperaturen unter der Tunneldecke und im Beton unmittelbar hinter der flüssigen Brandlast
Temperatures beneath the tunnel ceiling and inside the concrete close to the pool fire

ren die Düsen 5,0 m über der Fahrbahn positioniert. Die Anlage wurde in diesem Fall 30 Sekunden nach Entzündung der letzten Brandwanne gestartet (entsprechend rund 2 Minuten nach Start der Messwertaufzeichnung). Die wesentlichen Randbedingungen der Versuche sind in Tab. 1 zusammengefasst.

3.1.1 Temperaturen in Brandnähe

Zur Bewertung der Temperaturreduzierung infolge Wassernebel werden in Bild 7 die in unmittelbarer Nähe zum Brandort gemessenen Temperaturen in Querschnitt D007 (2,4 m hinter der letzten Brandwanne) sowie die Temperaturen in der Betonplatte dargestellt. Die Betonplatte ist in Tunnellängsrichtung gesehen ungefähr an der Stelle befestigt ($x = 7,5$ m), an der sich auch der Messquerschnitt D007 ($x = 7,0$ m) befindet. Infolge der vorgegebenen Luftströmung in Längsrichtung werden die heißen Brandgase konvektiv transportiert, sodass der Querschnitt D007 im Bereich der maximalen Temperaturen liegt. Die in Bild 7 mit gepunkteter Signatur dargestellten Verläufe (D007, $H = 5,20$ m) beschreibt die Lufttemperatur unmittelbar unter der Zwischendecke.

Beim Freibrand (ohne Einsatz der Brandbekämpfungsanlage, BBA) steigt die Temperatur unter der Tunnelzwi-

schendecke unmittelbar hinter den Brandwannen innerhalb von einer Minute auf fast 700 °C an und verbleibt über ca. 5 Minuten auf diesem Niveau, bis der in den Brandwannen befindliche Dieseldraftstoff aufgezehrt ist. Im Vergleich dazu steigt bei Einsatz der Brandbekämpfungsanlage die Temperatur anfangs auf ein vergleichbares Temperaturniveau, fällt jedoch nach Auslösung der BBA deutlich auf 200–400 °C ab. Durch den Einsatz von Wassernebel reduziert sich damit die mittlere Gastemperatur unter der Zwischendecke auf ungefähr die Hälfte.

3.1.2 Temperaturen im Beton

In Bild 7 ist ferner der Temperaturverlauf² in der oben beschriebenen Betonplatte dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind von den Daten der fünf Temperatursensoren nur die abgebildet, die zum einen nah an der

² Beim Versuch mit Einsatz der Brandbekämpfungsanlage betrug die Ausgangstemperatur der Betonplatte bei Versuchsbeginn ca. 80 °C, da der Versuch in kurzer zeitlicher Abfolge zum vorherigen Brandversuch durchgeführt wurde. Die Betonplatte konnte deshalb nicht auf Umgebungstemperatur abkühlen. Da die im Brandversuch eintretende Erwärmung deutlich über die Ausgangstemperatur hinaus erfolgt, wurde die Darstellung im Sinne der besseren Vergleichbarkeit auf eine gleiche Ausgangstemperatur bei Versuchsbeginn ($T_0 = 22$ °C) reduziert.

Oberfläche (0,2 cm Betondeckung) und zum anderen möglichst tief im Beton (4 cm Betondeckung) positioniert sind. Beim 30 MW Freibrand (ohne Einsatz der Brandbekämpfungsanlage, BBA) steigt die Temperatur im Betonquerschnitt oberflächennah (Betondeckung 0,2 cm) auf maximal ca. 300°C an. Dagegen bleibt beim Einsatz der Brandbekämpfungsanlage die gemessene Maximaltemperatur unter 200°C. In größerer Tiefe im Querschnitt (Betondeckung 4 cm), also in dem Bereich kurz vor der Bewehrung, treten bei den 30 MW Bränden aufgrund der durch die begrenzte Dieselmenge kurzen Brandeinwirkungsdauer in beiden Fällen keine kritischen Temperaturen auf. Die Betontemperatur in 4 cm Tiefe liegt bei ca. 80°C (ohne Einsatz von Wassernebel) bzw. 46°C (mit Einsatz von Wassernebel).

3.2 Flüssigkeitsbrand 100 MW

Die zuvor gezeigten Temperaturverläufe von zwei „kleinen“ Flüssigkeitsbränden werden im Folgenden noch durch einen Brand mit einer theoretischen Wärmefreisetzungsrate von 100 MW ergänzt, bei dem zusätzlich auch die Halbquerlüftung aktiviert wurde. Diesbezüglich ist anzumerken, dass der im Versuchstunnel installierte passive Brandschutz jedoch nicht auf 100 MW Freibrände ausgelegt ist. Um eine strukturelle Schädigung des Versuchstunnels auszuschließen, durfte daher ein derart großer Flüssigkeitsbrand nur mit aktivierter Brandbekämpfungsanlage durchgeführt werden. Der Vergleich zu Fällen ohne Brandbekämpfungsanlage muss daher bei solch großen Bränden (ab 60 MW) durch Gegenüberstellung mit theoretischen Brandkurven aus einschlägiger Literatur erfolgen.

3.2.1 Temperaturen in Brandnähe

In den 1970er Jahren wurde für Kohlenwasserstoffbrände in Industrie und Off-Shore-Anlagen die sog. Hydrocarbon-Kurve (HC-Kurve) entwickelt. Speziell für Brände in Tunneln wurde auf gleicher Basis eine erhöhte HC_{inc}-Kurve definiert, um den aus Gütertransport resultierenden höheren Brandlasten besser gerecht zu werden. Bei der HC_{inc}-Kurve ist die Maximaltemperatur gegenüber der HC-Kurve von 1100°C auf 1300°C angehoben worden [3]. Sie kann stellvertretend für Benzin- und Diesellachenbrände angewendet werden [8], wobei detaillierte Angaben der Randbedingungen (Brennstoffmenge, Fläche der Lache, Lüftungsbedingungen) nicht bekannt sind.

Die in Bild 8 rot dargestellte HC_{inc}-Kurve steigt innerhalb von gut zwei Minuten auf eine maximale Temperatur von 1300°C an und verbleibt bei dieser über die gesamte Branddauer. Darüber hinaus sind die aufgezeichneten Lufttemperaturen in drei verschiedenen Messquerschnitten mit zunehmendem Abstand vom Brandort dargestellt: D007 (unmittelbar hinter den Brandwannen unterhalb der Zwischendecke), D015 (10,40 m hinter den Brandwannen in 5 m Höhe, d.h. 20 cm unter der Zwischendecke) und D045 (40,60 m hinter den Brandwannen, ebenfalls in 5 m Höhe).

Im Querschnitt D015 tritt ein kurzzeitiger Anstieg der Temperatur auf fast 1200°C auf und stimmt damit in guter Näherung mit dem nach HC_{inc}-Kurve zu erwartenden Temperaturverlauf überein. Dieser Umstand kann als Bestätigung für die Wahl der HC_{inc}-Kurve zur Beschreibung des Brandverhaltens ohne Brandbekämpfungsanlage gewertet werden. Rund 1 Minute nach Aktivierung der

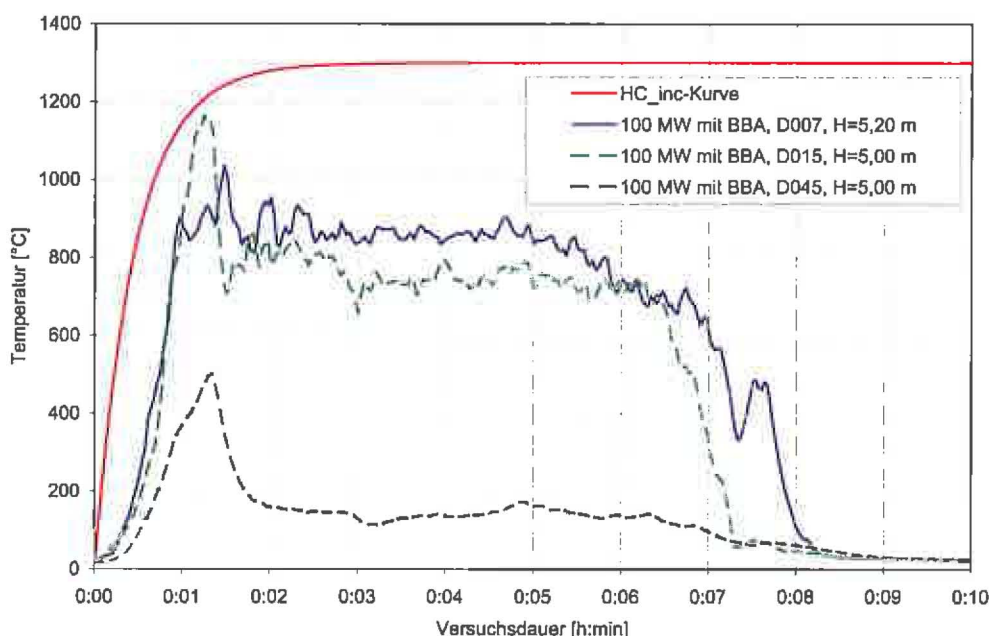


Bild 8 Lufttemperaturen unter der Zwischendecke in unterschiedlicher Entfernung hinter dem Brand (7, 15 und 45 m hinter der Mitte der flüssigen Brandlast) sowie Hydrocarbonkurve zum Vergleich
Air temperatures beneath the intermediate ceiling 7, 15 and 45 m behind the middle of the fire load and Hydrocarbon-Curve for comparison

Brandbekämpfungsanlage pendelt sich die Lufttemperatur in den brandnahen Querschnitten D007 und D015 auf ca. 800 °C ein und verbleibt während der Branddauer auf diesem Niveau. Nach ca. 7 Minuten ist das Brandgut weitgehend verbraucht und die Temperatur sinkt wieder auf Umgebungstemperatur ab.

In Längsrichtung reduziert sich die Lufttemperatur unter der Zwischendecke bis zum Querschnitt D45 auf unter 200 °C. Dies ist im Wesentlichen auf die kühlende Wirkung der WN-BBA und die Extraktion von Brandgasen durch die Querlüftung zurückzuführen. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Dimensionierung der Querlüftung (120 m³/s) auf 30 MW Brände ausgelegt ist. Durch die Wirkung der Wassernebelanlage reicht die Kapazität der Querlüftung in diesem Fall aber dennoch aus, um die Brandgase eines 100 MW Brandes zu bewältigen.

Der Vergleich der gemessenen Gastemperaturen mit der HC_{inc}-Kurve belegt die infolge Wassernebeleinsatz verminderte Temperaturbelastung der Zwischendecke im Brandnahbereich (D007 und D015). Im Betrachtungszeitraum nach Auslösung der Brandbekämpfungsanlage liegt die durchschnittliche Gastemperatur rund 500 °C unter der HC_{inc}-Kurve. In etwas weiterer Entfernung (D045) ist die Temperaturreduzierung noch ausgeprägter.

3.2.2 Temperaturen im Beton

In Bild 9 sind (analog zur Darstellung in Bild 7) die Temperaturen im Betonquerschnitt der Tunneldecke und die Lufttemperatur unmittelbar hinter der Brandlast (2,40 m hinter der Brandwanne) für den 100 MW Flüssigkeitsbrand dargestellt. Der unstete Temperaturverlauf in den ersten Minuten nach Brandbeginn ist für eine Material-

erwärmung nicht nachvollziehbar und lässt auf eine Schädigung (Rissbildung und Öffnung) der Betonplatte durch die extreme Temperaturbelastung während der Erwärmung schließen. Nach ca. 5 Minuten klingen die Temperatursprünge ab und gehen in einen zu erwartenden stetigen Verlauf über.

Unmittelbar unter der Betonoberfläche (0,2 cm Betondeckung) beträgt die maximale Erwärmung des Betonquerschnitts 500 °C. Mit zunehmender Tiefe im Betonquerschnitt werden geringere Temperaturen aufgezeichnet. Bereits in 1 cm Tiefe bleibt die Maximaltemperatur durch den Einsatz von Wassernebel unterhalb der nach ZTV-ING kritischen Temperatur für Bewehrung von 300 °C (allerdings beträgt die Branddauer hier auch nur ca. 8 Minuten und ist damit in Bezug auf die ZTV-ING-Kurve „zu kurz“).

3.3 Feststoffbrände

Bei den Feststoffbränden wird exemplarisch ein Brand mit der üblichen Auslöseverzögerung der Wassernebelanlage (4 Minuten nach Entzündung der Brandlast) mit einem Brand mit verzögerter Auslösung der Anlage (12 Minuten nach Entzündung) verglichen. Die planmäßige Wärmefreisetzungsbetrag bei allen durchgeführten Feststoffbränden 100 MW. Die Höhe der Brandlast maß insgesamt 4,0 m (einschließlich Sockel von 1,5 m Höhe). Beide Brandlasten waren mit einer PVC-Plane abgedeckt. Um eine Schädigung des Versuchstunnels zu vermeiden, war auch bei den Feststoffbränden ein freier Abbrand der 100 MW Brandlast nicht möglich. Durch die verzögerte Auslösung der WN-Anlage im zweiten Fall kann zumindest in der Anfangsphase (bis Minute 12) eine Gegenüberstellung von einem freien Abbrand mit einem Einsatz der Wassernebelanlage erfolgen.

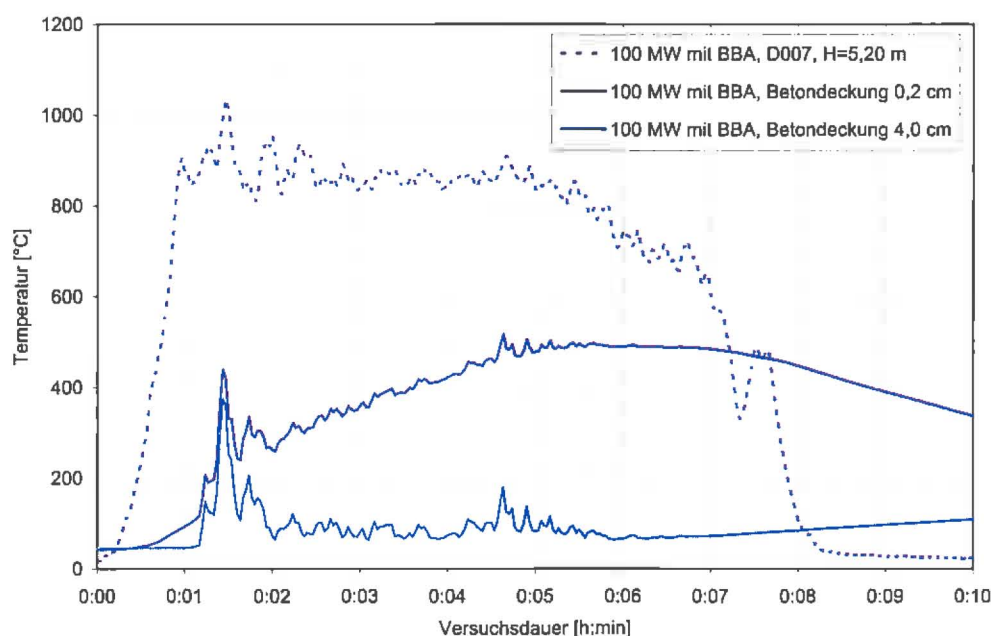


Bild 9 Temperaturen im Beton und unter der Tunneldecke unmittelbar hinter der flüssigen Brandlast
Temperature inside the concrete and beneath the tunnel ceiling in the liquid fire load zone

Tab. 2 Randbedingungen Feststoffbrände
Marginal Conditions for Solid Matter Fires

Auslöseverzögerung Wassernebelanlage	4 Minuten (Nr. 11061401)	12 Minuten (Nr. 11062401)
Brandlast (rechnerisch)	100 MW	100 MW
Höhe OK Brandlast	4,00 m mit PVC-Plane	4,00 m mit PVC-Plane
Längslüftung, Strömungsgeschwindigkeit	3,0 m/s	3,0 m/s
Halbquerlüftung, Absaugvolumen	120 m ³ /s	–
Höhe UK Sprühkopf über Fahrbahn	5,00 m	5,00 m

Bei beiden Versuchen war die Längslüftung auf rund 3 m/s Strömungsgeschwindigkeit eingestellt. Beim Brand mit der üblichen Auslöseverzögerung der Wassernebelanlage (4 Minuten nach Zündung der Brandlast) wurde zusätzlich die Halbquerlüftung aktiviert: Über den Rauchabsaugkanal oberhalb des Tunnels wurden 120 m³/s Brandgase abgesaugt. Die Düsen der Wassernebelanlagen waren 5,0 m über der Fahrbahn positioniert. Die wesentlichen Randbedingungen der Versuche sind in Tab. 2 zusammengefasst.

3.3.1 Temperaturen in Brandnähe

Vergleicht man die Temperaturentwicklung unter der Zwischendecke unmittelbar im Brandlastbereich (3 m hinter der Mitte der Brandlast, D003), so ist deutlich der Zeitpunkt der Aktivierung der Wassernebelanlage zu erkennen. Beim Versuch mit der üblichen Aktivierungszeit (4 Minuten) steigt die Temperatur unter der Zwischendecke bis auf nahezu 300 °C, um nach der Aktivierung wieder auf rund 50 °C abzusinken (Bild 10). Der qualitativ gleiche Temperaturverlauf ist auch beim Versuch mit verlängerter Vorbrenndauer zu sehen. Allerdings steigt die Temperatur unter der Zwischendecke bis zur Aktivierung

der Wassernebelanlage bis auf knapp über 1000 °C an. Nach Aktivierung fällt auch hier die Temperatur, allerdings aufgrund des weiter entwickelten Brandes erwartungsgemäß nicht so tief wie beim vorherigen Versuch, sondern „nur“ bis auf ca. 370 °C (Bild 10).

Die in Bild 10 dargestellten Temperaturen unter der Zwischendecke im direkten Brandbereich erreichen mehrere Minuten nach Aktivierung der Wassernebelanlage – nach dem oben beschriebenen vorübergehenden Abfall – wieder Werte zwischen 800 und 900 °C. Diese Temperaturen sind jedoch unterhalb der Decke gemessen worden und sind durch direkten Kontakt mit den Flammen zu erklären. Sie können deshalb nicht ohne weiteres zur Beurteilung der Wirksamkeit der Wassernebelanlage herangezogen werden.

Deutlicher und repräsentativer ist der positive Effekt der Wassernebelanlage im Querschnitt 10 m hinter der Brandlast erkennbar (15 m hinter der Mitte der Brandlast, D015, Bild 11). Nach 4 Minuten ist die Temperatur im oberen Bereich (auf 5,0 m Höhe, also 0,2 m unter der Zwischendecke) auf 150 bis 175 °C angestiegen. Nach Aktivierung der Wassernebelanlage (beim Versuch mit 4-minütiger Vorbrennzeit) fällt die Temperatur auf unter

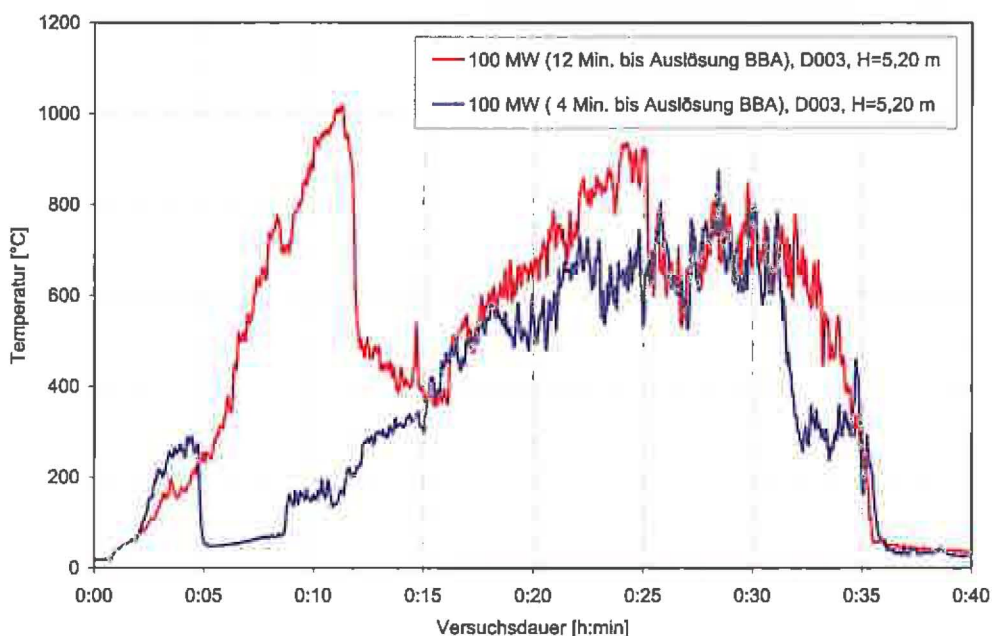


Bild 10 Temperaturen unter der Zwischendecke im Bereich der festen Brandlast (3 m hinter der Mitte der Brandlast)
Temperatures beneath the intermediate ceiling in the solid fire load zone (3 m behind the middle of the fire load)

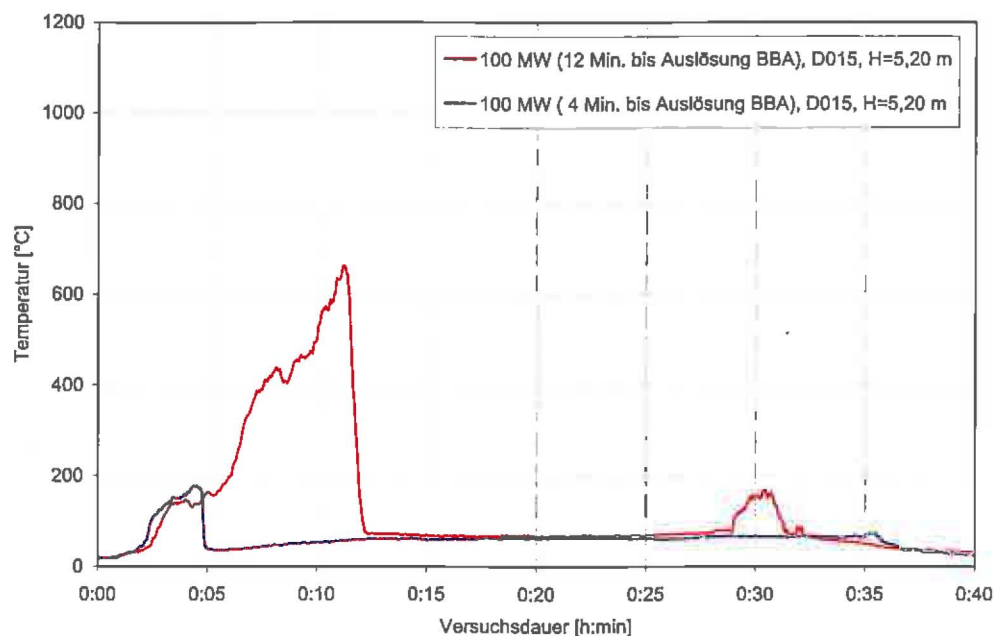


Bild 11 Temperaturverlauf unter der Zwischendecke 10 m hinter der festen Brandlast
Temperature curve beneath the intermediate ceiling 10 m behind the solid fire load

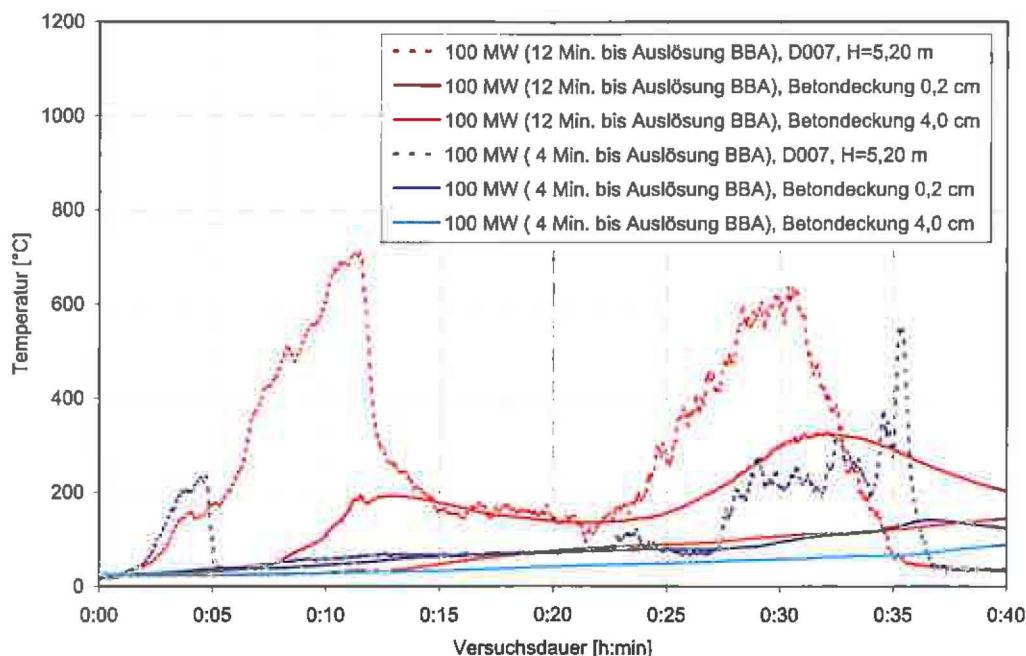


Bild 12 Temperaturen im Beton an der Tunneldecke unmittelbar hinter der Brandlast (Lufttemperaturen zum Vergleich)
Temperatures in the concrete at the tunnel ceiling directly behind the fire load (air temperature for comparison)

40°C. In den nächsten Minuten steigt sie dann auf ca. 60°C. Beim Versuch mit verlängerter Vorbrennzeit (12 Minuten) steigt die Temperatur zunächst unvermindert weiter und erreicht zum Zeitpunkt der Aktivierung der Wassernebelanlage rund 650°C. Nach Aktivierung der Anlage fällt sie rapide auf ca. 65°C ab.

3.3.2 Temperaturen im Beton

Die im Betonquerschnitt gemessene Temperatur spiegelt die geringere Temperaturbelastung durch den Einsatz der WN-Anlage deutlich wider (Bild 12).

Im Fall der verlängerten Vorbrennzeit steigt die Betontemperatur unmittelbar unter der Bauteiloberfläche (Betondeckung 0,2 cm) bis zur Auslösung der Brandbekämpfungsanlage nach 12 Minuten auf nahezu 200°C an. Infolge der kühlenden Wirkung des Wassernebels steigt die Temperatur oberflächennah innerhalb der folgenden 15 Minuten nicht weiter, sondern sinkt zunächst sogar auf 140°C ab. Infolge der wieder ansteigenden Lufttemperaturen steigt aber auch die Temperatur im Beton bis zum Verlöschen des Brandes auf ca. 320°C. Im Bereich nahe der Bewehrung (Betondeckung 4,0 cm) übersteigen die Temperaturen zu keinem Zeitpunkt 200°C und bleiben damit unterhalb des kritischen Wertes von 300°C.



Bild 13 Aufnahmen mit Wärmebildkamera kurz nach Versuchsende (100 MW Flüssigkeitsbrand und 100 MW Feststoffbrand, jeweils mit Einsatz von Wassernebel)
Recordings by thermal imaging camera shortly after the end of the tests (100 MW pool fire and 100 MW solid matter fire, both with activation of water mist)

Bei frühzeitiger Auslösung der Brandbekämpfungsanlage (nach 4 Minuten) zeigt sich tendenziell der gleiche Verlauf, jedoch auf einem insgesamt deutlich niedrigeren Temperaturniveau. Selbst unmittelbar unter der Betonoberfläche übersteigen die Temperaturen zu keinem Zeitpunkt 200°C . Eine Schädigung der Bewehrung kann unter diesen Umständen selbst im Bereich der maximalen Temperaturbelastung ausgeschlossen werden.

Neben den erfassten Messwerten zeigt auch das in 5 m Entfernung zur Brandlast angeordnete Target (Palettenstapel) die ausmaßmindernde Wirkung einer Wassernebelanlage. Sowohl beim Brand mit 4-minütiger als auch beim Brand mit 12-minütiger Auslöseverzögerung war die Zielbrandlast unversehrt und wies lediglich Rußspuren auf, obwohl die Hauptbrandlast nahezu vollständig verbrannt war. Dies lässt darauf schließen, dass der Wassernebel den Brand einkapselt.

Der Effekt einer Einkapselung des Brandes wird auch durch die Aufnahmen der Wärmebildkamera bestätigt (Bild 13), in denen die Erwärmung der Decke unmittelbar nach den 100 MW Feststoff- und Flüssigkeitsbränden qualitativ abgebildet ist. Beide Aufnahmen entstanden wenige Minuten nach dem Verlöschen des Brandes. Beim Feststoffbrand (rechts) löscht die Feuerwehr zu diesem Zeitpunkt noch verbliebene Brandnester. Deutlich erkennbar beschränkt sich die Erwärmung der Tunneldecke auf einen kleinen Bereich von wenigen Quadratmetern. In allen anderen Wand- und Deckenbereichen ist, wenn überhaupt, nur eine unwesentliche Erwärmung der Betonoberfläche erkennbar.

3.4 Bewertung der Ergebnisse

Ein vorrangiges Ziel des Einsatzes von Brandbekämpfungsanlagen bei Bränden in Tunneln ist die Reduzierung der Brandentwicklung, weil durch die Eindämmung eines Brandes die Selbst- und Fremdrettungsmöglichkeiten ver-

bessert werden und die Belastung des (Beton-)Bauwerks vermindert wird. Die dargestellten Versuchsergebnisse zeigen, dass eine Wassernebel-Brandbekämpfungsanlage die Entwicklung sowohl von Feststoffbränden als auch Flüssigkeitsbränden positiv beeinflussen kann. Bei beiden Brennstoffen übt der Wassernebel eine kühlende Wirkung auf die Brandlast und auf die Umgebung aus, sodass die Temperaturen weniger schnell ansteigen. Besonders positiv macht sich dieser Effekt einige Meter hinter der Brandlast bemerkbar (in Strömungsrichtung). Damit wird die Gefahr des Brandübersprungs auf andere Fahrzeuge – wie es die Zielbrandlasten gezeigt haben – sehr stark reduziert. Darüber hinaus wird durch die geringeren Temperaturen im Brandumfeld ein Löschangriff durch die Feuerwehr oft überhaupt erst möglich.

Für die Fremdrettungsphase und die Brandbekämpfung müssen die Temperaturen im Bereich vor dem Brand, also auf der Zustromseite, ausreichend niedrig sein. Dies soll auch in Tunneln ohne Brandbekämpfungsanlage durch eine ausreichende (Längs-) Lüftung sichergestellt werden. Berichte von Personen im Testtunnel und Messungen (hier nicht gezeigt) belegen, dass der Wassernebel die Wärmestrahlung auch bei großen Bränden (100 MW) soweit abschirmt, dass eine Annäherung an die Brandlast bis auf wenige Meter möglich ist.

Damit die Konstruktion eines Tunnels ihre Tragfähigkeit nicht verliert, ist es wichtig, dass die Temperatur an der Bewehrung 300°C nicht überschreitet – so wie es in der ZTV-ING gefordert wird. Für die in der ZTV-ING zur Bemessung heranzuziehende Brandkurve kann dies ohne weiteren Nachweis durch eine Betondeckung von 6 cm gewährleistet werden. Deshalb ist es wichtig, dass diese Betondeckung bei Bränden nicht zerstört wird oder abplatzt. Versuche haben jedoch gezeigt [7], dass dies nur eingeschränkt gewährleistet werden kann (und zwar nach heutigem Kenntnisstand durch die Zugabe von PP-Fasern). Dennoch muss bei einer gegenüber der ZTV-ING-Kurve verlängerten Hochtemperaturphase mit einer über-

300°C hinausgehenden Erwärmung der Bewehrung gerechnet werden.

Solche temperaturbedingten Bauwerksschäden und die Erwärmung der Bewehrung bei verlängerten Brandkurven werden durch die Kühlung und Einkapselung des Brandes infolge Einsatz einer Brandbekämpfungsanlage auf einen kleinen Bereich eingegrenzt oder sogar vollständig vermieden. Der kühlende und eindämmende Effekt ist dabei umso größer, je früher die Brandbekämpfungsanlage aktiviert wird. Die möglichst frühzeitige Aktivierung ist deshalb besonders wichtig. Die Größe der Brandlast (z.B. 100 MW) stellt bei der Bewertung nur noch ein untergeordnetes Kriterium zur Bewertung der Folgen dar.

Die Brandbekämpfungsanlage selbst ist durch das durch die Rohrleitungen fließende Wasser ausreichend geschützt. Alle Versuche, einschließlich der Vorversuche insgesamt mehr als 30, wurden mit derselben Konfiguration durchgeführt. Es mussten weder Rohrleitungen noch Düsenköpfe ausgetauscht werden. Um jedoch für die jeweiligen Versuche vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten, wurden die Düsen jeweils zuvor kontrolliert und gereinigt.

Literatur

- [1] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 13/2012 vom 21.09.2012, Veröffentlichung in Verkehrsdatenblatt Heft 19/2012 vom 15.10.2012.
- [2] BERGMEISTER, K.: *Sicherheit und Brandschutz im Tunnelbau*. Betonkalender 2013, Verlag Ernst und Sohn, Berlin.
- [3] BLOSFELD, J.: *Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln*. Bericht zum Forschungsprojekt F 1100.2306000 des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken- und Ingenieurbau (B).
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen (2012), *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING – Ausgabe März 2012*.
- [5] FRIEBEL, W.-D.; BLOSFELD, J.; KAUNDINYA, I.: *Neueste Entwicklungen beim Brandschutz von Straßentunneln*. Bau-technik 87 (2010), Heft 5, S. 243–253.
- [6] FRIEBEL, W.-D.; HEIMBECHER, F.; BLOSFELD, J.: *Tunnelbetrieb und Sicherheit in Tunnelbau*. Tunnelbau Taschenbuch 2011.
- [7] FRIEBEL, W.-D.; HEIMBECHER, F.: *Aktuelle Entwicklungen beim baulichen Brandschutz von Straßentunneln in Deutschland*. In: Unterirdisches Bauen für zukunftsfähigen Umwelt- und Klimaschutz, STUVA-Tagung 2011 in Berlin; Forschung + Praxis, 44, S. 167–170.
- [8] KORDINA, K.; MEYER-OTTENS, C.; RICHTER, E.: *Beton-Brandschutz-Handbuch* (Concrete fire protection manual), 2. Aufl., Verlag Bau + Technik, Düsseldorf 1999.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SOLIT2 wurden im Mai und Juni 2011 mehr als 30 Großbrandversuche durchgeführt. Auf Basis der erzielten Messergebnisse konnte zum Ersten die Wirksamkeit von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln nochmals bestätigt werden. Zum Zweiten konnten wichtige Daten gewonnen werden, mit denen die Entwicklung mathematisch-numerischer Modelle zur Abbildung der komplexen Vorgänge beim Einsatz von Wassernebel im Brandbereich nachgebildet werden können. Zum Dritten wurden reale Daten gewonnen, die für die Beurteilung von Kompensationsmöglichkeiten bei Einsatz von Wassernebelanlagen gebraucht werden.

Die Versuche belegen die erfolgreiche Einkapselung des Brandes durch den Wassernebel. Im unmittelbaren Brandbereich wird die thermische Belastung der Tunnelstruktur deutlich gesenkt, sodass auch bei großen Brandlasten Schäden nur lokal sehr begrenzt auftreten können. Abseits vom Brandort werden die kritischen Werte mit ausreichender Sicherheit unterschritten. Auch wird ein Brandübersprung, durch den es zur Entstehung von Großbränden kommen kann, wirkungsvoll verhindert.

- [9] LEUCKER, R.; KRATZMEIR, S.: *Ergebnisse von Brandversuchen zur Beurteilung der Effizienz von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln*. In: Unterirdisches Bauen für zukunftsfähigen Umwelt- und Klimaschutz, STUVA-Tagung 2011 in Berlin; Forschung + Praxis, 44, S. 178–183.

Autoren



Dr.-Ing. Roland Leucker
r.leucker@stuva.de



Dipl.-Ing. Frank Leismann
f.leismann@stuva.de

STUVA e.V.
Mathias-Brüggen-Straße 41
50827 Köln